

Pierluigi Muschiato - O&M Ingegneria

Marcella Avalle- CDM DOLMEN

## Terre armate: soluzione per il ripristino di un versante franato

Nel Novembre del 2019, in una località del basso Piemonte, in una zona collinare tra l'Appennino e le Langhe, un'intensa precipitazione, durata diversi giorni, favorì l'innesco di fenomeni franosi nel versante sito nella medesima località e già compromesso da eventi atmosferici avvenuti nei mesi precedenti. La frana, per scivolamento, si sviluppò per un fronte di circa 20 m lineari di forma conoidale, con altezza variabile dai 6 a 7 m lineari e profondità di circa 11 m lineari; essa produsse il distacco del margine di un terrazzo, composto da materiale colluviale poggiante su un banco roccioso, a sua volta costituito da strati alternati di arenaria, sabbia poco cementata ed argillite sovra consolidata. L'evento franoso, inoltre, trascinò con sé materiali litici di medie dimensioni, che distrussero parte di un muro di contenimento, ivi collocato, resosi inadatto a supportare una spinta di elevata intensità.



Figura 1 - Immagini dopo l'evento franoso

### Scelta del tipo di soluzioni da adottare

La pericolosità dell'evento, che ha rischiato di compromettere l'integrità di un edificio di civile abitazione in fase costruttiva sito ai piedi del versante franato, ha richiesto l'intervento immediato per la realizzazione di un progetto, atto a ripristinare, stabilizzare e, ovviamente, mettere in sicurezza il versante colpito.

Tale progetto è stato affidato all'Ing. Pierluigi Muschiato, titolare dello Studio Muschiato Ingegneria, che valutate le criticità dell'intervento e, soprattutto, dell'area di lavoro, ha deciso di adottare come tecnica per la ricostituzione del versante l'uso di terre armate, soluzione che, ad oggi, rappresenta indubbiamente una valida alternativa alle tradizionali tecniche di stabilizzazione dei pendii, sia per quanto concerne il lato economico quanto quello estetico e di sostenibilità e di inserimento ambientale, aspetto che è entrato a far parte dei capisaldi imprescindibili nella professione ingegneristica.

Il versante è stato, quindi, ricostruito con l'uso di terre armate disposte su due diversi livelli, il primo da quota +0.00 m a quota + 4.25 m, il secondo da quota + 4.25 m a 5.55 m, facendo, inoltre, particolare attenzione all'allontanamento delle acque dal corpo frana, necessario sia nella fase esecutiva dell'opera che

successivamente ad opera ultimata, per evitare futuri eventi franosi prodotti dall'instaurazione di circolazione idrica sopra le rocce e nelle fratture con conseguente formazione di superfici di scivolamento.

Il drenaggio delle acque meteoriche e la loro regimazione superficiale sono stati eseguiti realizzando una sagomatura superficiale del versante al fine di ricondurre le superfici non orizzontali ad un angolo di declivio compatibile con la natura del materiale impiegato a regimare le acque meteoriche. La corrivazione delle acque è stata, invece, rinviata attraverso un rapido accrescimento del manto erboso ed una successiva piantagione di specie autoctone della zona.

Sul retro dell'abitazione, ivi presente, sarà realizzato un canale di scolo, che raccoglierà le acque superficiali di corrivazione e quelle derivanti dalle rocce. Per quanto concerne, invece, il drenaggio degli accumuli di terreno e le pareti in terra armata, ad esse saranno fissate tubazioni micro fessurate  $\phi$  100mm su due diversi piani.



Figura 2 - Fasi realizzative dell'opera

La scelta progettuale di intervenire tramite realizzazione di terre armate, tecnica ben nota nella letteratura dell'ingegneria naturalistica, si è resa immediatamente indispensabile per diversi motivi: in primo luogo la difficile accessibilità dell'area d'intervento e, in secondo luogo, per la conseguente necessità di ridurre la movimentazione di materiale esterno all'area di lavoro. La zona da stabilizzare, essendo circondata da boschi e caratterizzata da pendii particolarmente acclivi, ne rendeva difficile il raggiungimento da parte di grandi mezzi d'opera, che sarebbero stati necessari per un qualsiasi altro tipo di intervento. Per quanto riguarda la movimentazione di materiale esterno all'area di lavoro questo aspetto è stato risolto tramite il recupero ed il riutilizzo del materiale franato. Le terre armate infatti sono sostanzialmente costituite da due materiali: la terra ed il rinforzo; la prima svolge sostanzialmente il ruolo di un calcestruzzo, ovvero si contraddistingue per una buona resistenza a compressione, la seconda, sopperisce alla scarsa capacità del terreno di resistere a trazione.

Nel caso specifico, la situazione ha consentito il reimpiego totale del materiale franato costituito da terra coloniale e rocce, che insieme ai rinforzi geosintetici (denominati geogriglie), inseriti per strati successivi orizzontalmente all'interno del terreno, hanno consentito lo sviluppo, per attrito, di uno stato tensionale di natura tangenziale che ha a sua volta consentito al sistema composito di sostenere livelli di sollecitazione ben superiori rispetto alle possibilità della sola matrice solida (terreno). La terra armata è, inoltre, nota come opera vegetata, consente quindi, un inserimento ambientale completo, garantito anche dall'inerbimento del fronte e dalla successiva piantagione di specie autoctone della zona, che oltre a dare

risalto estetico mantenendo l'integrità del paesaggio circostante, aiuta a proteggere il paramento frontale dall'azione erosiva e fornisce sostegno maggiore.

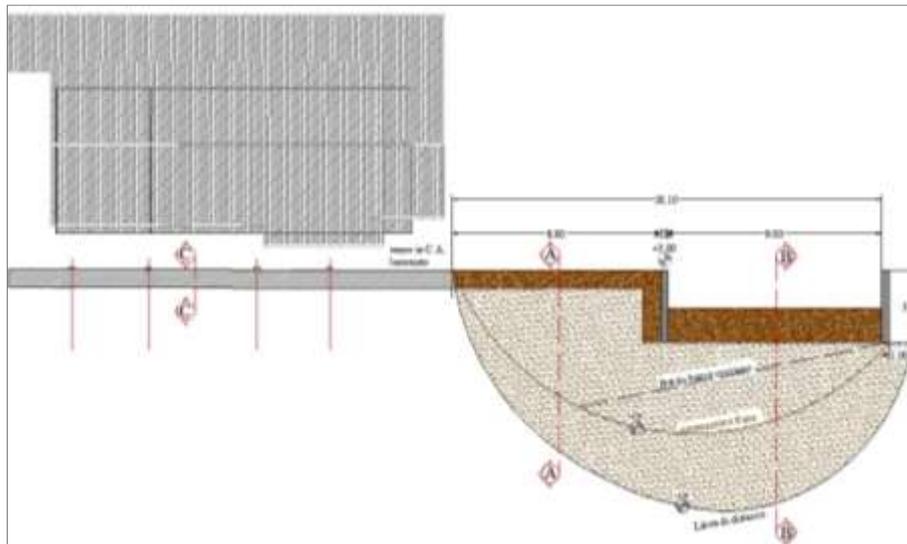


Figura 3 - Planimetria dell'area di intervento

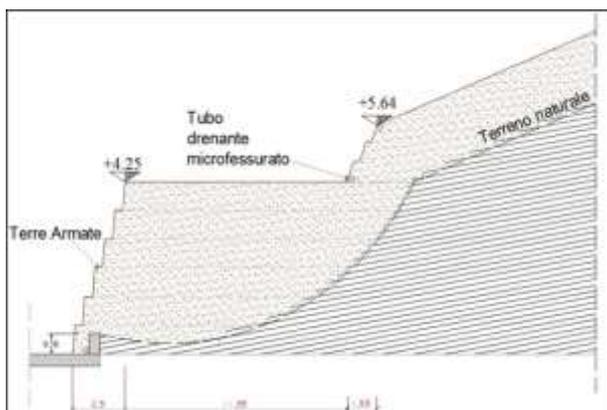


Figura 4 - Sezione A-A area di intervento

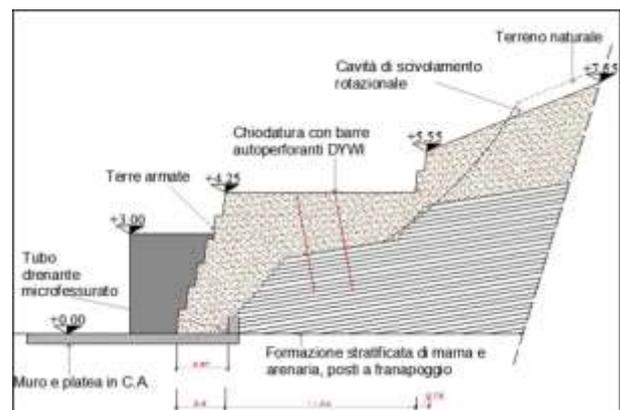


Figura 5 - Sezione B-B area di intervento

Non meno importante è l'aspetto legato alla rapidità di costruzione dell'opera, infatti nonostante le difficoltà riscontrate nella zona di lavoro particolarmente accidentata, la celerità dell'intervento ha consentito di salvaguardare la zona e l'abitazione limitrofa in costruzione in tempi record; tale aspetto unito alla possibilità di adottare materiali reperiti in loco ed altri a costi vantaggiosi, come le geogriglie e le geostuoie o biotessili adottate per agevolare il rinverdimento, garantisce un vantaggioso risparmio economico. Rappresentano indubbiamente un valore aggiunto anche caratteristiche tecniche quali:

- L'elasticità che risulta possedere la struttura, dimostrando di sopportare le azioni sismiche molto meglio delle strutture rigide;
- Un migliore comportamento rispetto ad altre opere simili a carichi dinamici come gli impatti;
- Basso impatto energetico se confrontato ai tradizionali muri di sostegno.

La diffusione delle terre armate negli ultimi trent'anni, non è quindi frutto di casualità, ma è segno di una nuova consapevolezza progettuale che, pur non dimenticando l'aspetto funzionale, economico e

soprattutto di sicurezza e stabilità dell'opera, si mobilita per rispettare l'ambiente che lo circonda, per mantenerlo e arricchirlo senza stravolgerlo.

### Calcolo

Merita, inoltre, di essere annoverato il metodo di calcolo e di modellazione strutturale che si è scelto di effettuare con l'ausilio di DOLMEN, software di calcolo di comprovata affidabilità che consente di eseguire un'analisi dettagliata del comportamento geotecnico e strutturale. In particolar modo è stato utilizzato il software IS GeoPendii, che studia l'analisi di stabilità di pendii basandosi su i metodi all'equilibrio limite, consentendo l'inserimento dello specifico intervento che si è deciso di realizzare nel pendio stesso, nel caso specifico le terre armate.

Le terre armate, sono opere di sostegno a tutti gli effetti e come tali sono comprese nelle Norme Tecniche per le costruzioni NTC 2018, incorporate nel software DOLMEN per poter essere utilizzate, sia nel calcolo statico con l'approccio progettuale 1 che si è scelto di utilizzare, sia per il calcolo sismico di stabilità del pendio, eseguito anch'esso in accordo con quanto previsto dalle Norme Tecniche, in particolare al paragrafo 7.11.3.5.2, ossia tramite applicazione di un'azione pseudostatica equivalente proporzionale al peso del volume di terreno parzialmente instabile.

Le terre armate sono soggette in particolare modo a verifiche esterne, interne e composte. Le verifiche esterne riguardano l'opera considerata come monolitica (opera di sostegno rigida), e consistono nello scorrimento lungo la base, il ribaltamento al piede e la capacità portante. Le verifiche interne riguardano la verifica di monoliticità dell'opera in sé stessa, isolata dal pendio, e consistono nello scorrimento diretto lungo un livello di rinforzi, nella resistenza a trazione e a sfilamento dei rinforzi, e sono condotte come di seguito indicato. Infine, le verifiche composte sono eseguite considerando il contributo che ciascuna terra offre alla stabilità globale, considerata come parte integrante del pendio.

I principi seguiti nel calcolo, come anticipato precedentemente, fanno riferimento al consolidato metodo all'equilibrio limite, nel quale all'interno di un pendio molto esteso e sottoposto a deformazione piana si isola un volume mediante una superficie cilindrica. Il terreno è in equilibrio limite quando viene soddisfatta la condizione di rottura, che nell'ipotesi del criterio di Mohr-Coulomb è funzione della coesione, dell'angolo di resistenza al taglio e della pressione interstiziale. Se lungo la superficie la tensione tangenziale applicata, detta resistenza mobilitata, è minore della resistenza a rottura disponibile, si può determinare una condizione di equilibrio limite tramite un coefficiente di sicurezza, che rappresenta il fattore per cui dividere i parametri di resistenza del terreno ed avere la rottura del pendio lungo la superficie considerata. Questo valore è assunto per determinare la sicurezza del pendio nei confronti della rottura per taglio e viene assunto costante lungo tutta la superficie, in modo che in ogni punto di essa venga mobilitata la stessa aliquota di resistenza al taglio. Si ricava che il fattore di sicurezza è dato dal rapporto tra la resistenza disponibile e quella mobilitata. Per determinare tale valore si utilizzano le equazioni dell'equilibrio dei corpi rigidi ossia le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale ed alla rotazione rispetto ad un punto del piano delle forze. Nel pendio viene definito un numero elevato di superfici, ad ognuna di queste è possibile associare un fattore di sicurezza. Il fattore di sicurezza minore definisce la cosiddetta superficie critica e viene assunto come rappresentativo delle condizioni di stabilità del pendio. Nell'ambito della teoria

dell'equilibrio limite sono stati sviluppati numerosi metodi per il calcolo del fattore di sicurezza, fra questi vi sono i cosiddetti metodi delle strisce, che prevedono di suddividere il volume di terreno considerato in blocchi di spessore finito, ma piccolo, di cui è possibile scrivere le equazioni di equilibrio. È possibile considerare, con questi metodi, pendii di forma complessa costituiti da terreni aventi caratteristiche fisiche e meccaniche diverse. Per mantenere le strisce in condizione di equilibrio bisogna applicare sui lati e sulla base le risultanti degli sforzi efficaci e delle pressioni interstiziali, che si trasmettono mutuamente tra i blocchi. Vengono, quindi generate nell'ambito del calcolo le possibili superfici di rottura e, fra tutte le superfici di scivolamento realizzate, verrà scelta nell'ambito delle diverse metodologie di calcolo solo la superficie di rottura denominata critica, ovvero quella che possiede il fattore di stabilità più basso.

Si riportano di seguito l'immagine presa direttamente dal software DOLMEN con riportate le superficie di rottura generate nel pendio attraverso diversi metodi adottati e implementati da IS GeoPendii, tra cui il metodo di Bishop, il metodo di Fellenius, il metodo GLE/Morgenstern-Price e, infine, il metodo di Spencer, impiegati per i due diversi pendii in cui si è deciso di suddividere il versante ai fini di calcolo. Una volta individuata la superficie critica, viene fatta la suddivisione a strisce precedentemente menzionata per attribuire l'opportuno coefficiente di sicurezza critico.

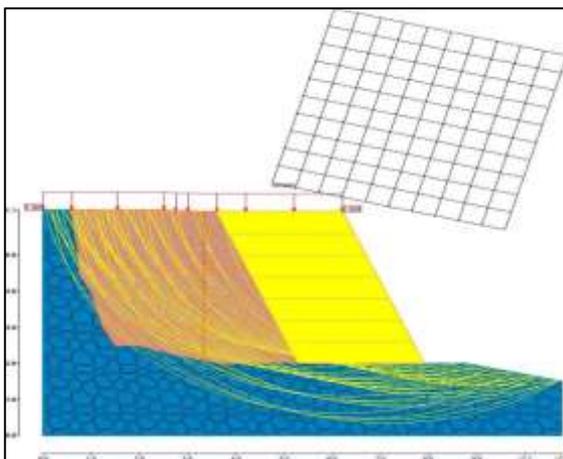


Figura 6 - Superfici generate per il 1° pendio

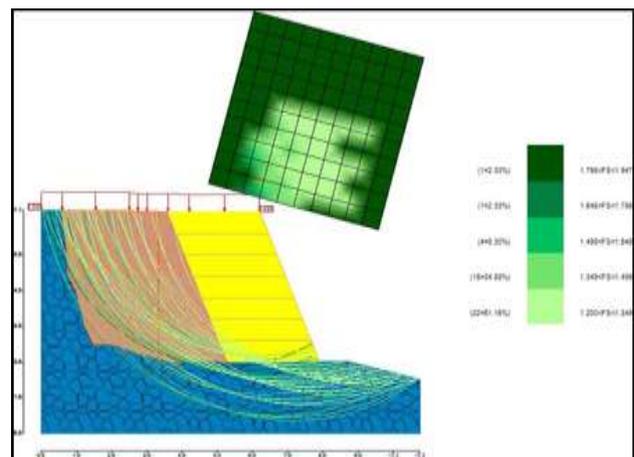


Figura 7 - Fattori di sicurezza calcolati con Fellenius

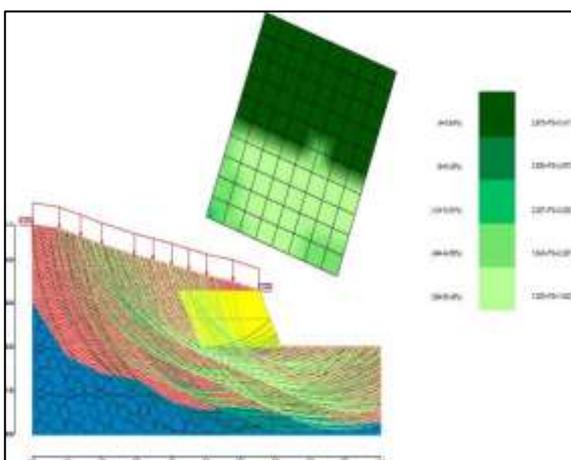


Figura 8 - Fattori di sicurezza calcolati con Bishop

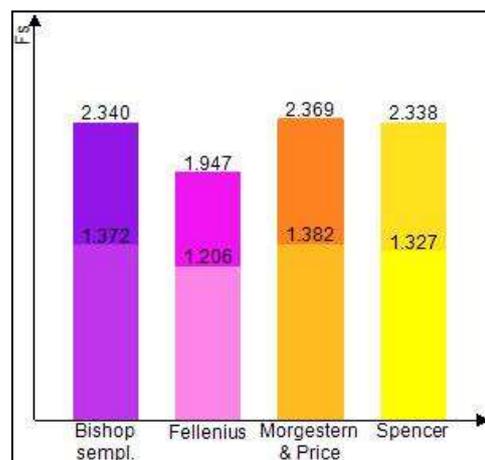


Figura 9 - Confronto fattori di sicurezza

Al termine del calcolo, sviluppato con diversi metodi, è stato possibile confrontarli e realizzare una comparazione tra i diversi fattori di sicurezza calcolati, il risultato ottenuto è stato positivo, ossia verifiche soddisfatte secondo tutte le teorie applicate.